

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ •

УДК 629.366

Электрическая тяга и электроотбор мощности с.-х. трактора

Д-р техн. наук П. А. АМЕЛЬЧЕНКО, инж-ры И. Н. ЖУКОВСКИЙ (ОИМ НАН Беларуси),
А. Г. СТАСИЛЕВИЧ, А. В. КЛЮЧНИКОВ, А. И. ЖУКОВСКИЙ (ОАО "МТЗ", zhuk93@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрены применение и эффективность электрической тяги и электроотбора мощности на с.-х. тракторах.

Ключевые слова: трактор, электрическая тяга, электрический отбор мощности, мотор-генератор, тяговый двигатель, механическая характеристика, буксование, тяговая характеристика.

Основным источником тяги на современных с.-х. тракторах остается механический силовой поток дизельного двигателя. Тяговая сила движителей тракторов формируется переданным трансмиссией крутящим моментом дизеля с учетом ограничений, накладываемых сцепными свойствами движителей и опорной поверхности почвы или дороги.

Длительное (более 100 лет) использование на тракторах двигателей внутреннего сгорания (ДВС) привело к загрязнению почвы вредными компонентами отработавших газов (ОГ) до такой степени, что возникла потребность их ограничения и контроля в зонах мировых рынков сбыта тракторов, в т. ч. введения законодательных национальных и межнациональных норм [1, 2]. Однако реализация этих норм не останавливает дальнейшее загрязнение почвы, а лишь замедляет его темп. Вредное воздействие ДВС на окружающую среду сегодня становится весьма серьезной экологической проблемой.

Современные наука и техника пока не располагают эффективными средствами по замене на с.-х. тракторах и машинах двигателей на минеральном топливе агрофильными силовыми установками, но имеют возможность заметно снизить вредное воздействие ДВС на окружающую среду.

Один из возможных путей снижения вредных выбросов ОГ и расхода топлива — исключение дизеля

из скоростного регулирования трактора и перевод дизеля на стационарный скоростной режим работы в зоне минимального расхода топлива. Наилучшим образом это обеспечивается применением в силовой передаче полнопоточной электромеханической передачи по схеме "дизель — электрогенератор — силовой преобразователь электротока — тяговый электродвигатель и электродвигатели отбора мощности — механическая трансмиссия — движители". При этом дизель изолирован от переменного сопротивления движению и нагружается только моментом сопротивления электрогенератора. Тяга движителей формируется не механическим силовым потоком дизеля, а только крутящим моментом тягового двигателя (двигателей). Дизель становится первичным двигателем передвижной индивидуальной электростанции, а трактор в целом приобретает новое свойство — электрическую тягу.

Вторая серьезная предпосылка внедрения электрической тяги и электроотбора мощности на с.-х. тракторах — нарастающая необходимость комплексной автоматизации машинно-тракторных агрегатов (МТА) и мобильных земледельческих технологий. Из опыта промышленного производства известно, что только после перевода промышленности на электроэнергетику и перевода технологического оборудования на электропривод стало возможным осуществить автоматиза-

цию промышленного производства от станков-автоматов до автоматических производств. По аналогии с промышленностью комплексная автоматизация земледелия станет возможна только на основе единой электроэнергетической базы средств и объектов автоматизации и перевода МТА на электрическую тягу и электрический привод активных рабочих органов сельхозмашин.

Под электрической тягой трактора понимается тяга, формируемая силовым потоком тягового электродвигателя в соответствии с его механической характеристикой и сцепными свойствами движителей с опорными поверхностями, как в электроподвижном составе железных дорог и коммунального транспорта.

Тяговая функция трактора значительно шире функций тяги на электроподвижном составе упомянутых транспортных средств. Трактор — в большей степени технологическая машина внедорожного применения с широкими диапазонами изменения коэффициента сопротивления движению $f = 0,02 \dots 0,25$ и коэффициента сцепления $\varphi = 0,3 \dots 0,8$, частыми чередованиями основного технологического процесса (на гоне) и вспомогательных (на разворотной полосе). Трактор отдает на тягово-приводных операциях до 70 % своей мощности на привод активных рабочих органов сельхозмашин. Большую часть времени он работает на энергоемких почвообрабатывающих опе-

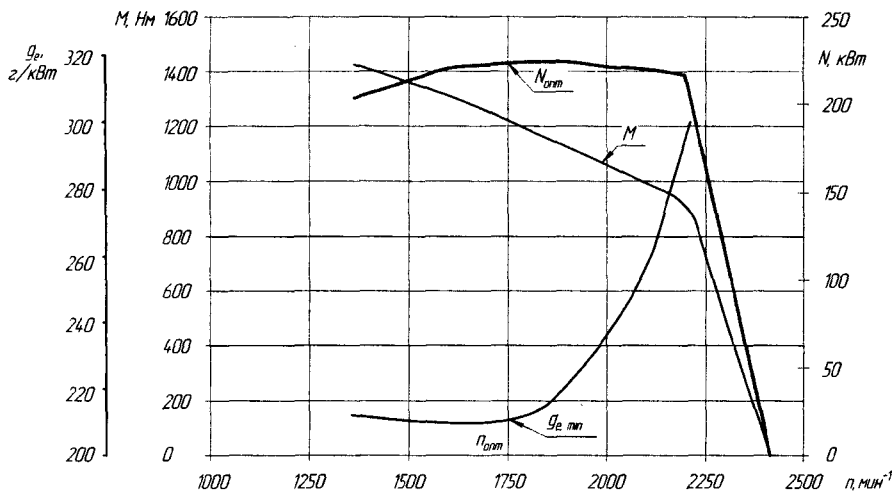


Рис. 1. Скоростная характеристика дизельного двигателя

рациях на скоростях 6—15 км/ч при высоких нагрузках как по тяге, так и по мощности (85—95 % от номинальных значений).

Современный тяговый привод для обеспечения электрической тяги и электроотбора мощности содержит типовой тракторный дизельный двигатель, асинхронный мотор-генератор (АМГ) переменного тока, силовой преобразователь электроэнергии, тяговый асинхронный частотно регулируемый двигатель (ТАД) и систему их управления [3]. Он встраивается в существующую компоновку трактора того же класса с механической трансмиссией, значительно сокращая количество элементов механического ступенчатого и бесступенчатого регулирования (зубчатых колес, валов, зубчатых и фрикционных муфт). При этом силовой поток дизеля формирует только электромагнитный силовой поток генератора и не влияет на качественные характеристики касательной силы тяги движителей.

За номинальную частоту вращения ротора АМГ $n_{амгн}$ принимается оптимальная по удельному расходу топлива частота вращения вала дизеля, при которой на рабочем участке внешней скоростной характеристики удельный расход топлива минимален $g_{e min}$, а мощность оптимальна $N_{д опт}$ (рис. 1). В настоящее время сложились три основных вида схем тягового электропривода на тягово-транспортных машинах [4].

Мотор-колесная схема содержит одну дизель-электрогенераторную

установку, силовой преобразователь, тяговые электромотор-редукторы в каждом ведущем колесе и систему управления ими. Она применяется на автомобилях БелАЗ [5], самоходных строительных машинах [6], самоходных опрыскивателях [7]. Для расширения диапазона скоростного регулирования применяются мотор-колеса с двухскоростными редукторами [6].

Мотор-колесная схема значительно сокращает механическую часть трансмиссии, оставляя в ней только колесные редукторы. Такая схема позволяет реализовать активный поворот тяговой машины за счет обеспечения разности частот вращения ведущих колес правого и левого бортов, в т. ч. и разворот машины вокруг ее центра масс. Однако эти преимущества практически недостижимы для с.-х. колесных трак-

торов, имеющих диапазон скоростного регулирования от минимальной до максимальной скорости не менее

$$D_V = \frac{V_{max}}{V_{min}} \approx 12...16. \quad (1)$$

При диапазоне регулирования современных тяговых двигателей $D_{тд} = 2...2,5$ для реализации скоростного диапазона трактора в колесном редукторе потребуются не две, а три—четыре переключаемые ступени.

У мотор-мостовой схемы, в отличие от предыдущей, применяется один тяговый двигатель на ведущий мост. Она находит применение на гусеничных (ДЭТ-250 [8, 9]) и колесных (Беларус-3023 [3]) тракторах. У последнего один тяговый двигатель приводит как задний, так и передний ведущие мосты. Эта схема позволяет исключить из механической трансмиссии только муфту сцепления и часть коробки передач, не позволяет реализовать активный поворот, сохраняет в гусеничном тракторе бортовые механизмы поворота, а у колесных — межколесные дифференциалы.

Серьезный недостаток этой схемы на тракторах — наличие механического привода заднего вала отбора мощности (ВОМ), что значительно усложняет компоновку трактора из-за необходимости взаимного согласования координат осей ДВС, тягового мотор-генератора, тягового двигателя, ведущих колес и хвостовика ВОМ. При замене механического отбора мощности на электрический взаимное согласование координат осей потребуются только у ди-

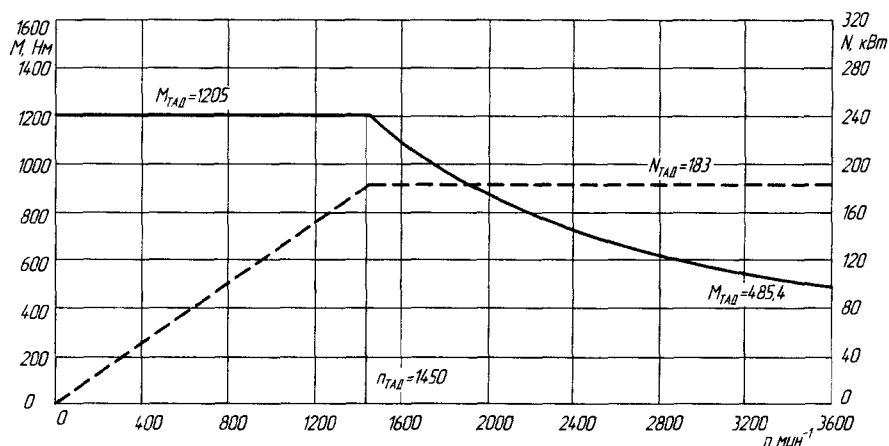


Рис. 2. Механическая характеристика ТАД трактора "Беларус-3023"

зеля с мотор-генератором и тягового двигателя с ведущими колесами (звездочками гусениц).

Мотор-бортная схема тягового привода предусматривает привод правого и левого бортов отдельными тяговыми двигателями и применяется в основном в гусеничных машинах [9]. При этой схеме бортовые механизмы поворота могут исключаться из механической части трансмиссии, а поворот — обеспечиваться разностью частот вращения бортовых двигателей. При изменении направления вращения бортовых двигателей обеспечивается разворот машины вокруг ее центра масс. Такую схему можно реализовать и на колесных машинах, что исключает межколесные дифференциалы, реализует активный поворот и разворот вокруг центра масс.

Формирование электрической тяги на тракторе можно проследить, если механическую характеристику тягового двигателя (рис. 2) привести к движителям трактора на каждой ступени механической части трансмиссии. При этом получим теоретическую скоростную характеристику трактора, которая описывает тяговые и мощностные возможности его движителей на конкретной опорной поверхности и представляет собой зависимости снимаемых с движителей суммарных касательной силы тяги P_k и тяговой мощности на ведущих колесах N_k от теоретической скорости движения трактора V .

Скоростная характеристика трактора с электрической тягой (рис. 3), как и механическая характеристика ТАД, имеет на каждой i -ой ступени механической трансмиссии два характерных участка. Участок постоянной тяги $P_{ki\text{ const}}$ на котором трактор трогается с места, и участок постоянной тяговой мощности на ведущих колесах $N_{ki\text{ const}}$ на котором он выполняет свои основные функции. Участку механической характеристики ТАД $n_{\text{тад}} = 0 \dots n_{\text{тад}}$ соответствуют участки теоретических скоростей трактора $V_i = 0 \dots V_{i\text{ min}}$, а участку $n_{\text{тад}} = n_{\text{тад}} \dots n_{\text{тад max}}$ — участки скоростей $V_i = V_{i\text{ min}} \dots V_{i\text{ max}}$.

Численные значения параметров скоростной характеристики определяются для каждой i -ой ступени по выражениям:

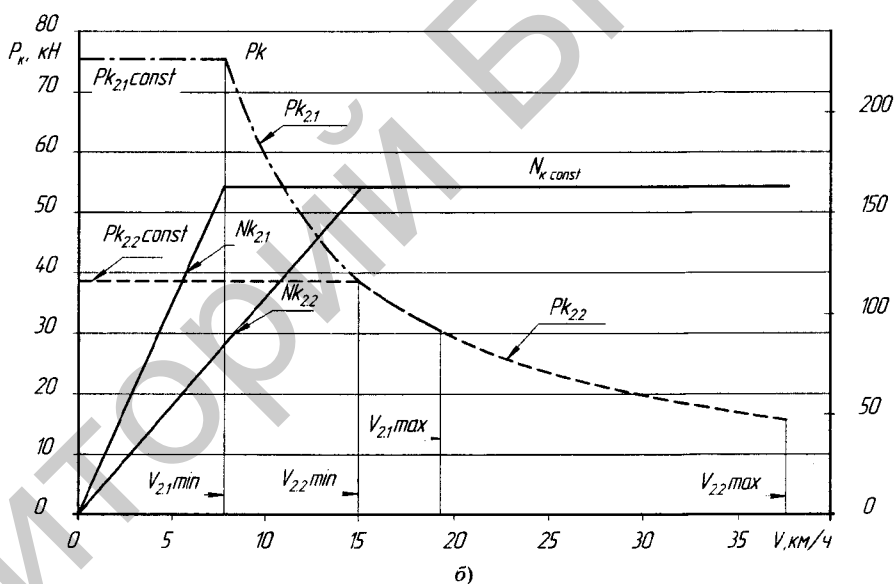
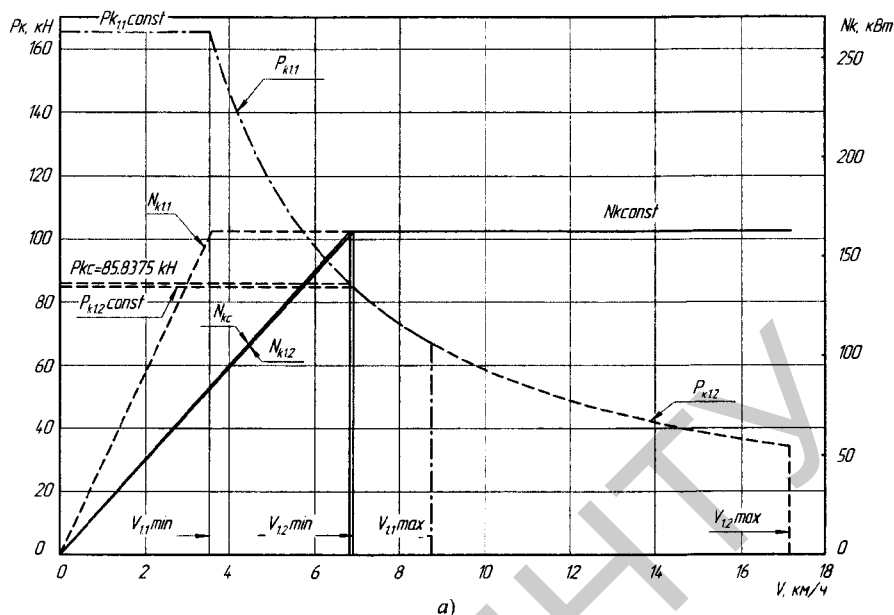


Рис. 3. Скоростная характеристика трактора "Беларус-3023" $P_k(V)$ и $N_k(V)$ на режимах "поле" (а) и "дорога" (б)

$$\begin{aligned} & \text{— на участке постоянной тяги} \\ m_3 g f_{\text{max}} & \geq P_{ki\text{ const}} = \\ & = \frac{M_{\text{тад}} n_i \eta_{\text{MT}i}}{R_k}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$N_{ki} = N_{\text{тад}} n_i \eta_{\text{MT}i} \frac{V_i}{V_{i\text{ min}}}; \quad (3)$$

— на участке постоянной мощности

$$P_{ki} = \frac{3,6 N_{\text{тад}} n_i \eta_{\text{MT}i}}{V_i}; \quad (4)$$

$$N_{ki\text{ const}} = N_{\text{тад}} n_i \eta_{\text{MT}i}, \quad (5)$$

где $M_{\text{тад}} n_i$, $N_{\text{тад}} n_i$ — номинальные значения крутящего момента и мощ-

ности ТАД; u_i — передаточное число механической трансмиссии на каждой i -ой ступени; $\eta_{\text{MT}i}$ — КПД механической трансмиссии на i -ой ступени; R_k — радиус качения ведущих колес трактора; ϕ_{max} — максимальный коэффициент сцепления ведущих колес на конкретной опорной поверхности; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; V_i — текущие значения теоретической скорости движения трактора.

$$V_i = \frac{3,6 \pi n_{\text{тад}} R_k}{30 u_i}. \quad (6)$$

Расчетные значения параметров механической характеристики ТАД

и соответствующие им значения параметров скоростной характеристики трактора "Беларус-3023" приведены в таблице.

Из рис. 3 и таблицы видно, что на участке постоянной тяговой мощности трактор может использовать номинальную мощность ТАД в полном объеме, бесступенчато регулируя силу тяги P_{ki} и скорость V_i .

На режиме "поле" (см. рис. 3, а, ступень 1.1) мощностные возможности ТАД ограничиваются сцепными свойствами движителей ($P_{кс} = 85,8375$ кН). Полная загрузка ТАД обеспечивается только с теоретической скорости $V = 6,83$ км/ч. На минимальной скорости ТАД нагружается до 51,88 % мощности, при этом касательная сила тяги колес $P_k = 84,778$ кН. На второй ступени режима "поле" ТАД нагружается до номинальной мощности на всем диапазоне от 6,9 до 17,15 км/ч и практически перекрывает агроскорости всех энергоемких тяговых с.-х. операций (кроме уборки корнеплодов). На режиме "дорога" (см. рис. 3, б) на асфальте трактор "Беларус-3023" реализует номинальную мощность на скоростях 7,65–37,15 км/ч. При этом перекрытие скоростей на ступенях 2.1 и 2.2 составляет 4,1 км/ч.

Однако для оценки тяговых и тягово-приводных возможностей трактора с электротягой необходима

характеристика, отражающая зависимости основных функциональных свойств (рабочей скорости движения V_p , буксования движителей δ , тяговой мощности на крюке $N_{кр}$, тягового КПД η_t и удельного расхода топлива g_r) от абсолютного $P_{кр}$ или относительного $\phi_{кр}$ тягового усилия на крюке как на тяговом режиме работы, так и на тягово-приводном.

Расчет теоретической тяговой характеристики трактора с электротягой осуществляется с учетом механической характеристики тягового электродвигателя и буксования движителей при бесступенчатом регулировании скорости движения трактора, а из внешней скоростной характеристики дизеля учитывается только оптимальная по расходу топлива мощность $N_{д\text{ опт}}$ и удельный расход топлива $g_{e\text{ min}}$ при этой мощности.

Известно, что бесступенчатое регулирование скорости движения и тягового усилия трактора существенно снижает буксование движителей. Так, у колесного трактора кл. 0,9 с объемной гидромеханической трансмиссией буксование ведущих колес в 1,5 раза ниже, чем у такого же трактора с механической ступенчатой трансмиссией [10]. Поскольку данные по буксованию ведущих колес с.-х. тракторов с электромеханическими трансмиссиями еще не накоплены, приведенное соотношение

по буксованию можно рекомендовать для предварительного тягового анализа тракторов с электротягой.

Полученные на МТЗ при тяговых испытаниях трактора кл. 5 (Беларус-2822) зависимости буксования от усилия на крюке $\delta(P_{кр})$ были обработаны средствами Windows Excel и аппроксимированы экспоненциальной функцией (рис. 4).

$$\delta = \delta_0 e^{a \phi_{кр}} = \delta_0 e^{a \frac{P_{кр}}{m_3 g}}, \quad (7)$$

где δ_0 — буксование ведущих колес при движении трактора без нагрузки на крюке ($P_{кр} = 0$; $\phi_{кр} = 0$), на стерне $\delta_0 = 0,0107$, на сухом асфальтобетонном покрытии $\delta_0 = 0,008$; a — опытный коэффициент, на стерне $a = 5,6519$, на асфальтобетонном покрытии $a = 3,536$; $\phi_{кр}$ — относительное тяговое усилие на крюке; $P_{кр}$ — тяговое усилие на крюке.

С учетом этого буксование ведущих колес трактора с электротягой опишется выражением:

— на стерне

$$\delta = 0,00713 e^{5,6519 \frac{P_{кр}}{m_3 g}}, \quad (8)$$

— на асфальте

$$\delta = 0,00533 e^{3,536 \frac{P_{кр}}{m_3 g}}. \quad (9)$$

Основные расчетные параметры механической характеристики тягового двигателя и параметры скоростной характеристики трактора "Беларус-3023"

| Механическая характеристика тягового двигателя | | Частота вращения ротора, мин ⁻¹ | | Крутящий момент, Н·м | | Мощность, кВт |
|--|------------------------|--|-----------|----------------------------------|--------------------|--|
| | | n_n | n_{max} | M_n | M_{min} | N_n |
| Скоростная характеристика трактора | | 1450 | 3600 | 1205,2 | 485,42 | 183 |
| Режим движения | Ступень редуктора, i | Теоретическая скорость, км/ч | | Касательная сила тяги по ТАД, кН | | Тяговая мощность на ведущих колесах, кВт |
| | | V_{min} | V_{max} | $P_{k\text{ max}}$ | $P_{k\text{ min}}$ | N_k |
| Поле | 1.1 | 3,543 | 8,796 | 165,44 | 66,696 | 162,815 |
| | 1.2 | 6,91 | 17,155 | 84,824 | 34,167 | 162,815 |
| Дорога | 2.1 | 7,655 | 19,006 | 76,569 | 30,839 | 162,815 |
| | 2.2 | 14,93 | 37,067 | 39,259 | 15,813 | 162,815 |
| Максимальная касательная сила тяги по сцеплению на стерне $P_{k\text{ max}} = m_3 g \phi_{max} = 85,8375$ кН, на асфальте $P_{k\text{ max}} = 98,1$ кН | | | | | | |

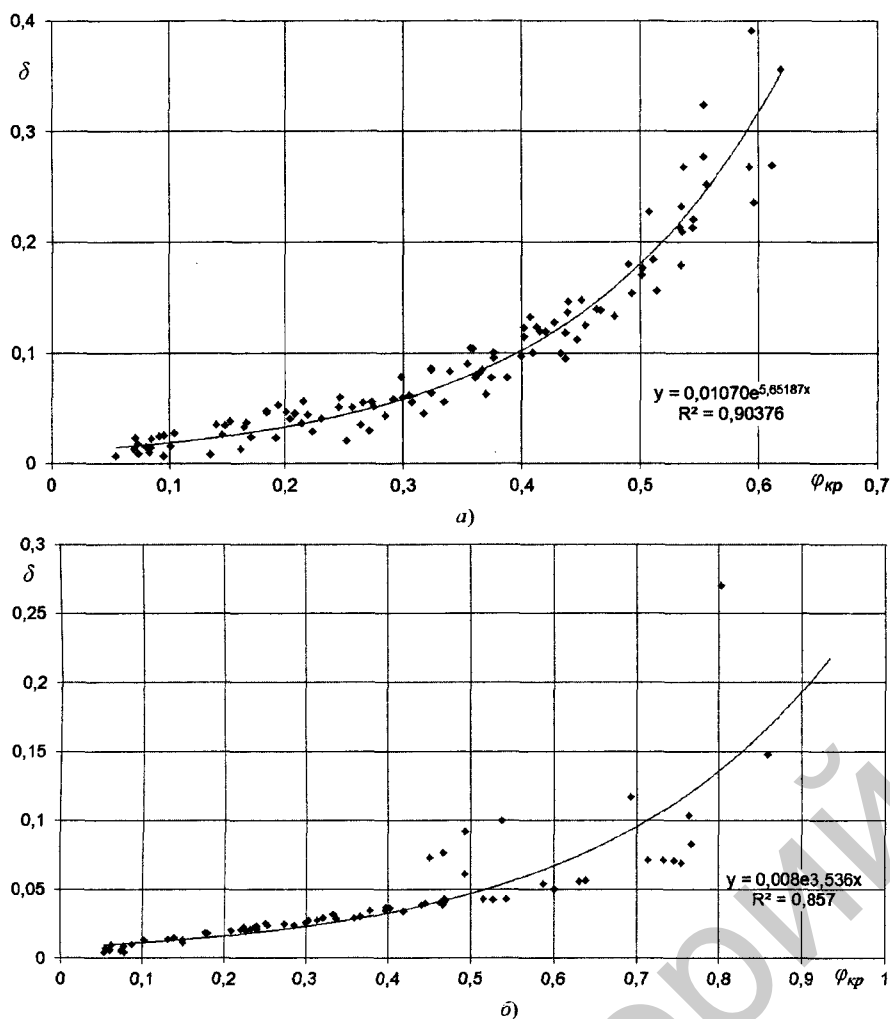


Рис. 4. Аппроксимация зависимости буксования от коэффициента использования сцепной массы на крюке $\delta(\phi_{кр})$ для трактора кл. 5 "Беларус-2822" на суглинке (а) и сухом асфальтобетонном покрытии (б)

Рабочая скорость движения трактора для каждой ступени механической части трансмиссии определяется по выражению:

$$V_{i \max}(1 - \delta_0) \geq V_p = \frac{3,6\pi N_{тад} \eta_{мтi}}{P_{кр} + P_f} (1 - \delta), \quad (10)$$

где $V_{i \max}$ — теоретическая скорость движения трактора при $n_{тад \max} = 3600 \text{ мин}^{-1}$ по выражению (6); δ и δ_0 — по выражению (8) или (9) в зависимости от опорной поверхности.

Поскольку рабочий участок механической характеристики тягового двигателя ограничивается частотой вращения его ротора $n_{тад} = n_{тад \min} \dots n_{тад \max}$ (см. рис. 3, б), то скорость V_p на каждой ступени механической трансмиссии ограничивается минимальным и максимальными значениями, соответствующи-

ми частотам вращения ротора тягового двигателя $n_{тад \min}$ и $n_{тад \max}$:

$$\frac{3,6\pi n_{тад \min} R_k}{30u_i} (1 - \delta_0) \leq V_p \leq \frac{3,6\pi n_{тад \max} R_k}{30u_i} (1 - \delta). \quad (11)$$

Ограничение рабочей скорости сверху соответствует тяговому усилию

$$P_{кр} = 0 \dots \frac{M_{тад \min} u_i \eta_{мтi}}{R_k}; \quad (12)$$

снизу — тяговому усилию

$$P_{кр \max} = \frac{M_{тад \max} u_i \eta_{мт}}{R_k} \leq m_{эg} \phi_{кр \max}, \quad (13)$$

где $M_{тад \min}$, $M_{тад \max}$ — минимальное и номинальное значения крутящего момента тягового двигателя; R_k —

радиус качения задних ведущих колес; u_i — передаточное число механической трансмиссии на каждой i -ой ступени редуктора; $m_{э}$ — эксплуатационная масса трактора.

Тяговая мощность:

$$N_{кр} = \frac{P_{кр} V_p}{3,6} = \frac{P_{кр} N_{тад} \eta_{мтi}}{P_{кр} + P_f} \left(1 - \delta_0 e^{\frac{P_{кр}}{m_{эg}}} \right). \quad (14)$$

Выразив номинальную мощность тягового двигателя через оптимальную мощность дизеля N_d при номинальной частоте вращения вала АМГ, КПД механической части трансмиссии $\eta_{мтi}$, КПД электрической передачи $\eta_{эп} = 0,8649$ [3] и с учетом того, что $\frac{P_{кр}}{P_{кр} + P_f} = \eta_f$ и $(1 - \delta) = \eta_{\delta}$, получим:

$$N_{кр} = N_d \eta_{эп} \eta_{мтi} \eta_{\delta} \eta_f = N_d \eta_{\tau}, \quad (15)$$

где $\eta_{\tau} = \eta_{эп} \eta_{мтi} \eta_{\delta} \eta_f$ — тяговый КПД трактора.

Удельный расход топлива на единицу тяговой мощности:

$$g_{\tau} = \frac{N_d g_{e \min}}{N_{кр}}, \quad (16)$$

где $g_{e \min}$ — удельный расход топлива дизеля на номинальном режиме электрогенератора.

При реализации на тракторе электрического отбора мощности на тяговый двигатель может быть подана мощность не более

$$N_{тад} \leq N_d \eta_{амг} (1 - \gamma_0), \quad (17)$$

где $\gamma_0 = N_0 / N_d$ — относительная величина отбора мощности; $\eta_{амг}$ — КПД мотор-генератора вместе с блоком силового регулирования; N_0 — мощность отбора на привод активных рабочих органов агрегатируемых машин.

Рабочая скорость трактора:

$$V_p = \frac{3,6 N_d (1 - \gamma_0) \eta_{эп}}{P_{кр} + P_f} \times \left(1 - \delta_0 e^{\frac{P_{кр}}{m_{эg}}} \right) \quad (18)$$

при ограничениях по выражению (10).

Тяговая мощность на крюке:

$$N_{кр} = N_d (1 - \gamma_0) \eta_{эп} \eta_{\delta} \eta_f = N_d (1 - \gamma_0) \eta_{\tau}. \quad (19)$$

Удельный расход топлива на единицу тяговой мощности определяется по выражению (16), а удельный расход топлива на единицу мощности отбора:

$$g_0 = g_e \min / \eta_{амг} \quad (20)$$

Общий КПД трактора определяется по выражению:

$$\eta_{трак} = \eta_T(1 - \gamma_0) + \eta_{амг}\gamma_0 \quad (21)$$

Входные данные для расчета тяговой характеристики трактора "Беларус-3022"

Эксплуатационная масса трактора, m_3 , кг 12 500

Оптимальная мощность двигателя, $N_{д опт}$, кВт 223

Удельный расход топлива дизеля при оптимальной мощности, $g_e \min$, г/(кВт·ч) 210,08

Радиус качения задних ведущих колес, R_k , м 0,908

Номинальная мощность тягового двигателя, $N_{тд н}$, кВт 183

Частота вращения вала тягового двигателя, \min^{-1} :

— номинальная, $\eta_{тд н}$ 1450

— максимальная, $\eta_{тд max}$ 3600

Передаточные числа механической части трансмиссии:

— на режиме "поле":

ступень 1.1, $u_{1.1}$ 140,106

ступень 1.2, $u_{1.2}$ 71,8344

— на режиме "дорога":

ступень 2.1, $u_{2.1}$ 64,8471

ступень 2.2, $u_{2.2}$ 33,2521

— заднего моста, $u_{3м}$ 27,618

Максимальное тяговое усилие для расчета буксования:

— на режиме "поле"

(стерня), $P_k \max$, кН
($\Phi_k \max$) 85,8375 (0,7)

— на режиме "дорога"

(асфальт), $P_k \max$, кН
($\Phi_k \min$) 116,4937 (0,95)

Сопротивление движению трактора:

— на стерне, P_f , кН (f) 12,2625 (0,1)

— на асфальтобетоне, P_f , кН (f) 2,4525 (0,02)

Пределы изменения тягового усилия при расчете, кН:

— на режиме "поле"

(стерня),
 $P_{кр \min} \dots P_{кр \max}$ 0—73,575

($\Phi_k \min \dots \Phi_k \max$) (0—0,6)

— на режиме "дорога"

(асфальт),
 $P_{кр \min} \dots P_{кр \max}$ 0—98,1

($\Phi_k \min \dots \Phi_k \max$) (0—0,8)

КПД:

— механической части трансмиссии, $\eta_{мт}$ 0,8897

— электрической передачи (АМГ-ТАД), $\eta_{эп}$ 0,8649

— электромеханической трансмиссии, $\eta_{эмт}$ 0,7695

На рис. 5 показана теоретическая тяговая характеристика трактора "Беларус-3023" на стерне (режим "поле", ступени 1.1 и 1.2), построенная по приведенным выше выражениям и входным данным. Из нее видно, что режим постоянной мощности ТАД реализуется при тяговых усилиях $P_{кр} = 21,86 \dots 74$ кН. При этом обеспечиваются рабочие скорости трактора $V_p = 16,77 \dots 5,4$ км/ч

при буксовании ведущих колес $\delta = 0,02 \dots 0,213$, тяговая мощность $N_{кр} = 102,35 \dots 121,8$ кВт при удельном расходе топлива $g_T = 451,622 \dots 380,64$ г/(кВт·ч). При допустимом буксовании $\delta_{доп} = 0,16$ трактор реализует тяговое усилие $P_{кр} = 67,6$ кН, тяговую мощность $N_{кр} = 115,8$ кВт на скорости 6,2 км/ч при удельном расходе топлива $g_T = 405$ г/(кВт·ч).

Максимальную тяговую мощность $N_{кр \max} = 121,8$ кВт трактор развивает при номинальном тяговом усилии $P_{кр н} = 55$ кН на рабочей скорости $V_p = 8$ км/ч при буксовании $\delta = 0,09$ и расходе топлива $g_T = 382$ г/(кВт·ч). Номинальное относительное тяговое усилие на крюке $\Phi_{кр н} = P_{кр н} / m_3 g = 0,448$, что на 12 % выше номинального значения $\Phi_{кр н} = 0,4$ для трактора кл. 5 с механической ступенчатой трансмиссией [4].

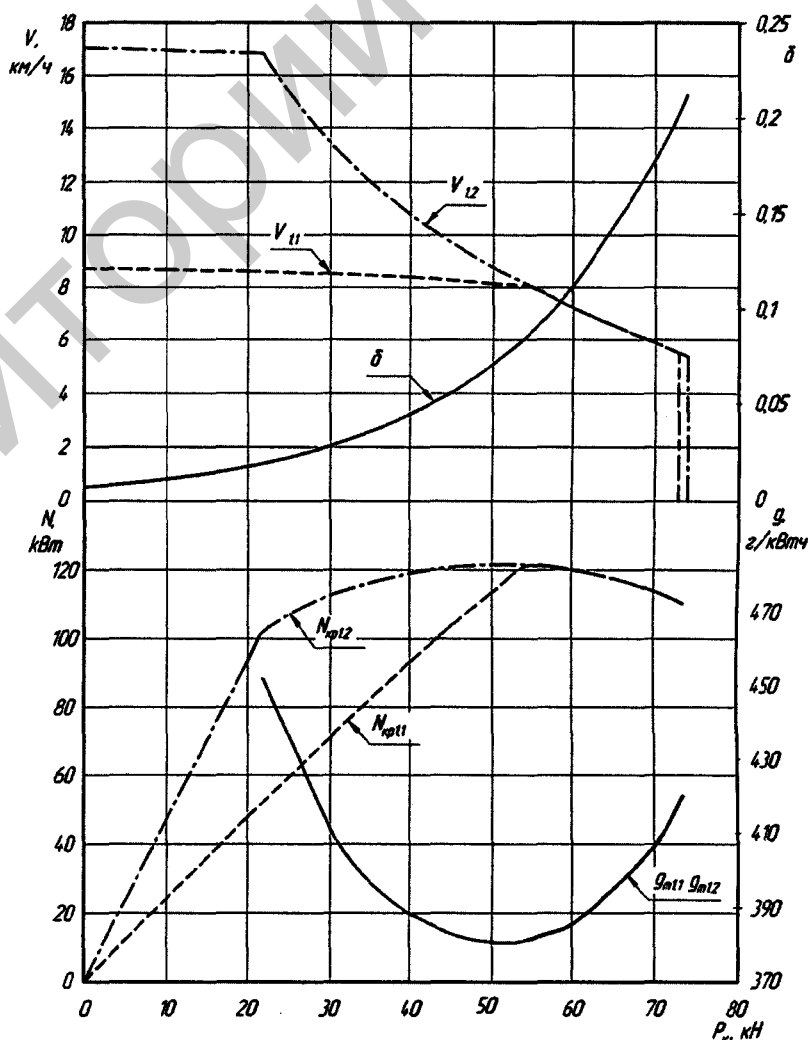


Рис. 5. Теоретическая тяговая характеристика трактора "Беларус-3023" на стерне

Такие же характеристики можно построить и на режиме "дорога" (асфальт), а также при электрическом отборе мощности по выражениям (17)–(21).

Для выявления преимуществ трактора с электротягой выполнено сравнение теоретических тяговых характеристик (рис. 6) на стерне тракторов "Беларус-3023" на режиме "поле" и "Беларус-3022" на втором скоростном диапазоне (передачи 7–12). Характеристики рассчитаны при равных номинальных мощностях двигателей и эксплуатационных массах.

Из рис. 6 видно, что при тяговых усилиях ниже номинального у серийного трактора с механической ступенчатой трансмиссией рабочие скорости V_p и тяговые мощности $N_{кр}$ на отдельных участках характеристики без учета потерь на переключение передач выше, чем у трактора с электротягой. При достижении тяги $P_{кр} \approx 56...57$ кН эти преимущества теряются и переходят к трактору с электротягой. Особенно заметны преимущества трактора с электротягой по сравнению с серийным по удельному расходу топлива (см. рис. 6, в). Если у серийного трактора минимальный расход топлива зависит от номера передачи и тягового усилия и сохраняет минимальные значения на узком участке тягового усилия (≈ 10 кН), то у трактора с электротягой удельный расход топлива на всем рабочем участке изменяется в пределах $380,6...451,6$ г/(кВт·ч), или не более чем на 18,6 %.

По тяговому КПД трактор с электротрансмиссией уступает трактору с механической трансмиссией до 6 %, но обеспечивает более высокую степень использования номинальной мощности двигателя на крюке $\gamma_{кр}$. Так, у трактора с механической трансмиссией из-за колебаний приведенного к валу ДВС крутящего момента средняя нагрузка двигателя составляет 94 % от номинальной ($\gamma_d \approx 0,94 N_n$) [11]. Из-за ступенчатого изменения скорости движения и работы ДВС на перегрузочной ветви характеристики мощность дизеля может изменяться в пределах 0,9–0,95 от номинальной. Все вместе приводит к тому, что средняя нагрузка ДВС не превышает 0,9 N_n . На тракторе с электротя-

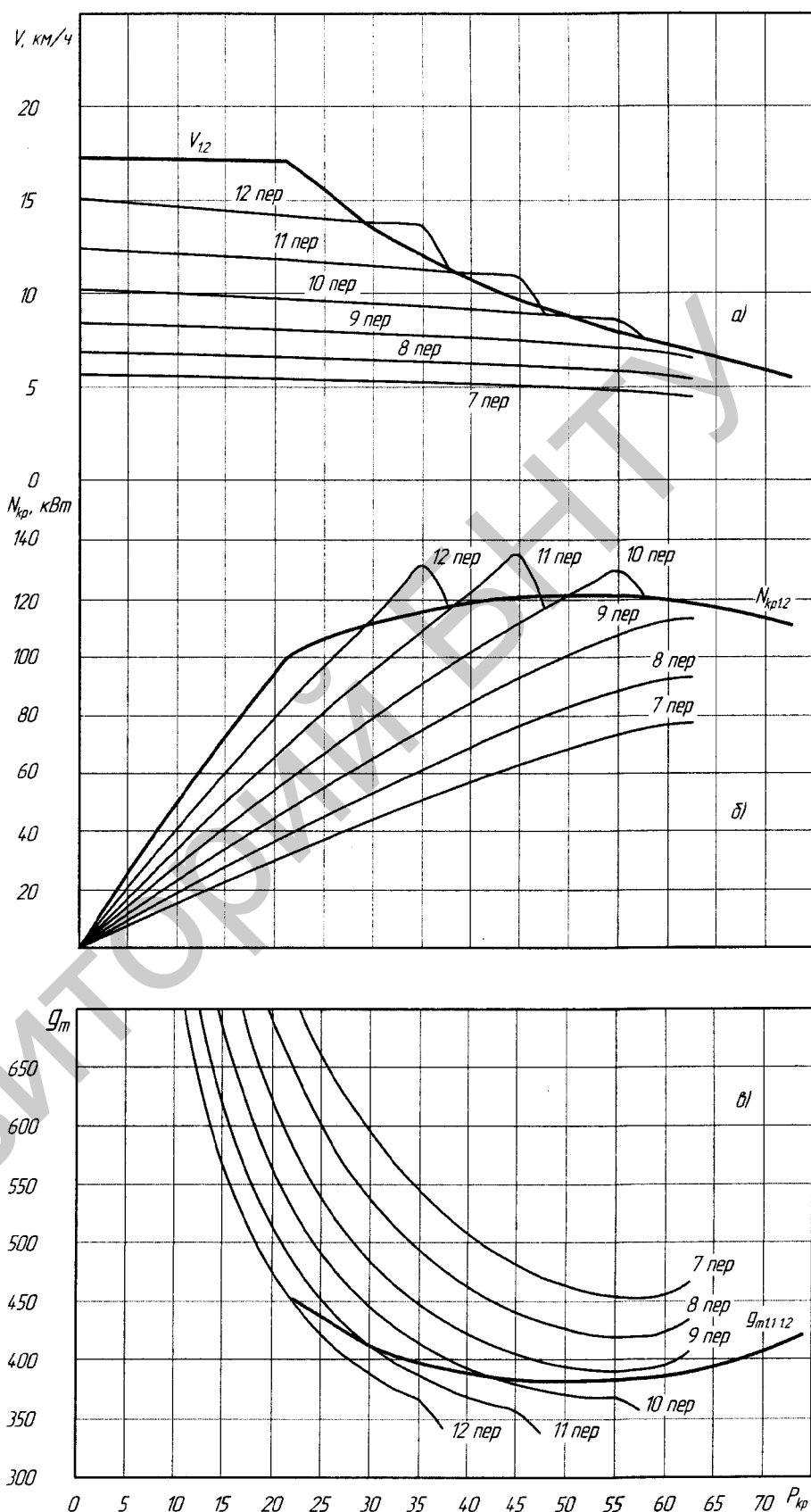


Рис. 6. Сравнение тяговых показателей тракторов с электромеханической и механической ступенчатой трансмиссиями:

а — по рабочим скоростям V_p ; б — по тяговой мощности $N_{кр}$; в — по удельному расходу топлива g_T

гой можно обеспечить загрузку дизеля на 100 % от номинальной, как на электротормозном стенде. В первом случае тяговая нагрузка на крюке будет $\gamma_{кр} = \eta_T \gamma_0 = 0,574$, а во втором $\gamma_{кр} = 0,56$.

Все это в совокупности обеспечивает повышение производительности трактора с электромеханической трансмиссией и снижает его погектарный расход топлива [3]. Дальнейшее снижение расхода топлива возможно путем замены традиционной вальной дизель-генераторной энергоустановки на свободно-поршневую дизель-генераторную установку возвратно-поступательного действия [12].

Применение на тракторах дизель-электрических силовых установок представляет широкие возможности для использования электрических отборов мощности на привод активных рабочих органов с.-х. машин, а также электропривода вместо традиционных гидроприводов для управления силовыми агрегатами трактора, рулевого управления, навесных систем, автоблокировки дифференциала, автоматического включения—выключения винтового моторного привода. Это, в свою очередь, открывает широкие возможности для сокращения объемов механических приводов и комплексной автоматизации тракторов и МТА вплоть до создания тракторов-автоматов и МТА-автоматов. Так, у гидроприводов автоматизация управления обеспечивается по ступеням "электронный блок — электромагнит — гидравлический клапан — гидролиния — силовой цилиндр — механическое устройство", а при электроприводе управление включает только "электронный блок — электродвигатель — механический привод". В электроприводе электронный блок в реальном времени управляет электромагнитным моментом электродвигателя или силой электромагнита.

Говоря о преимуществах электротяги на тракторе, необходимо учитывать, что внедрение такого трактора создаст благоприятные предпосылки для отказа в будущем от ДВС в с.-х. производстве и перевода земледелия на электроприводные технологии. В Европе фирмой New Holland

создан трактор NH² без ДВС, на котором в качестве силовой установки используется водородный электрохимический генератор. Одной заправки водорода пока хватает только на 2 ч работы под полной нагрузкой, но фирма намерена увеличить это время до 7 ч [13].

Следует обратить внимание и на то, что мировая электротехническая наука осваивает бесконтактную передачу электроэнергии, предложенную Николом Тесла еще 100 лет назад. По этому принципу уже сегодня работают модели электромобилей и электрокатеров с бесконтактным электроприводом [14]. В ВИЭСХе ведутся исследования по созданию энергоэффективного гибридного трактора мощностью 50—100 кВт с беспроводной системой зарядки электроаккумуляторов, экономией топлива 30 % и снижением уровня вредных выбросов в 5 раз [15], а также агробота с резонансной системой электроснабжения [16]. Успешное решение этой проблемы обеспечит в будущем полный переход на электроприводные экологически чистые технологии и создаст условия для комплексной автоматизации в земледелии.

Выводы

Внедрение на с.-х. тракторах тягового электропривода и электрического отбора мощности на привод активных рабочих органов сельхозмашин направлено на снижение вредных выбросов от ДВС и расхода топлива, повышение производительности МТА, создание условий для комплексной автоматизации МТА и сельскохозяйственных технологий.

При успешном решении этих задач будут созданы условия для отказа от ДВС как силовой установки трактора и перевода земледелия на электроприводные мобильные технологии.

Список литературы

1. Ксеневич И. П., Шевцов В. Г. Концепция тракторной моторно-трансмиссионной установки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 1999, № 12.
2. Николаев Е. В., Нистратова Н. С. Экологическая диагностика тракторов и

самоходных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2012, № 4.

3. Трактор с электромеханической трансмиссией / С. Н. Флоренцев и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2010, № 7.

4. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии / П. А. Амеличенко и др. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2013, № 8.

5. Бигель Н. В. Особенности конструкции самосвалов БелАЗ с электромеханической трансмиссией // Автомобильная промышленность. — 2010, № 12.

6. Бойцов В. В. Межотраслевая унификация и агрегатирование самоходных машин-орудий и автотранспорта. — М.: Издательство стандартов, 1975.

7. Четыре двигателя экономят 1/4 топлива // Современная сельхозтехника и оборудование. — 2011, № 4.

8. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов. Теория и расчет / П. П. Исаков и др. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981.

9. Кулаков А. Т., Макушин А. А. Разработка алтайского трактора в варианте с электромеханической трансмиссией // Тракторы и сельскохозяйственные машины. — 2012, № 2.

10. Деев О. И. Исследование бесступенчатой объемной гидромеханической трансмиссии сельскохозяйственного трактора и ее влияние на показатели работы машинно-тракторного агрегата: Дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж: Воронежский СХИ, 1978.

11. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А. А. Зангиев и др. — М.: Колос, 1996.

12. Пинский Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами // Мобильная техника. — 2004, № 2.

13. Взгляд в будущее // Современная сельхозтехника и оборудование. — 2009, № 3.

14. Стребков Д. С. Никола Тесла и современные проблемы электроэнергетики // Приводная техника. — 2007, № 1.

15. Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика и экология // Мат-лы 7-ой междунар. науч.-практ. конф. "Экология и сельскохозяйственные технологии: агроинженерные решения". Т. 1. — СПб.: СЗНИИМЭСХ, 2011.

16. Управление движением мобильных агроботов с резонансной системой электроснабжения / Д. С. Стребков и др. // Мат-лы 7-ой междунар. науч.-практ. конф. "Экология и сельскохозяйственные технологии: агроинженерные решения". Т. 3. — СПб.: СЗНИИМЭСХ, 2011.